

FTSR 低碳高强钢连续冷却相变和组织细化

高爱民¹ 杨琨¹ 冯运莉¹ 陈礼斌²

(1 河北理工大学金属材料工程系,唐山 063009; 2 唐山钢铁有限公司技术中心,唐山 063016)

摘要 用 Gleeble-3500 热模拟机研究了低碳钢(%: 0.19C, 1.15Mn, 0.008Mo, 0.002Ti, 0.032Als) 85 mm FTSR(薄板坯连铸连轧)铸坯在1 000 ℃以5 s⁻¹速率变形40%,然后以5 ℃/s冷却到900 ℃并以50 s⁻¹的速率变形30%,再以1~70 ℃/s冷却到400 ℃,空冷的连续相转变和组织。结果表明,冷却速度≤20 ℃/s时连续冷却转变的组织为铁素体和珠光体;冷却速度达30 ℃/s时,组织中出现少量粒状贝氏体。随冷却速度增加,晶粒尺寸减小,当冷却速度达10 ℃/s时,钢中的晶粒尺寸≤10 μm,当冷却速度≥20 ℃/s时,钢中晶粒细化程度减弱。

关键词 FTSR 工艺 低碳高强度钢 相变 组织细化

Continuous Cooling Transformation and Structure Refinement of A Low Carbon High Strength Steel Produced by FTSR

Gao Aimin¹, Yang Kun¹, Feng Yunli¹ and Chen Libin²

(1 Metal Material Engineering Department, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009;
2 Technology Centre, Tangshan Iron and Steel Co Ltd, Tangshan 063016)

Abstract Continuous cooling transformation (CCT) and structure of 85 mm FTSR (Flexible Thin Slab rolling) cast slab of a low carbon steel (%: 0.19C, 1.15Mn, 0.008Mo, 0.002Ti, 0.032Als) deformed 40% with strain rate 5 s⁻¹ at 1 000 ℃ then cooling with 5 ℃/s to 900 ℃ and deformed 30% with 50 s⁻¹ and cooling to 400 ℃ with 1~70 ℃/s, then air cooling have been studied by Gleeble-3500 thermo-mechanical simulator. Results showed that as cooling rate ≤20 ℃/s, the CCT structure of steel was ferrite and pearlite, and as cooling rate was up to 30 ℃/s, minor globular bainite occurred in structure; with increasing cooling rate the grain size decreased, and as cooling rate was up to 10 ℃/s the grain size in steel was ≤10 μm and as cooling rate was ≥20 ℃/s, the grain refinement extent was minor.

Material Index FTSR Process, Low Carbon High Strength Steel, Transformation, Structure Refinement

由于FTSR(Flexible Thin Slab Rolling)薄板连铸坯与传统厚板坯在坯料铸造过程、加热制度、轧制过程等方面有显著差异^[1],为此研究了FTSR低碳高强钢的连续冷却转变规律及组织细化的影响因素。

1 试验材料与方案

试验材料为唐钢热轧薄板厂生产低碳高强钢(唐钢牌号T510L)用85 mm厚连铸薄板坯,其化学成分见表1所示,加工成直径Φ10 mm、长15 mm的热模拟试样。

试验在Gleeble-3500热模拟机上进行,采用热膨胀法测定低碳高强钢的动态CCT曲线。模拟实验方案为:

(1)试样以10 ℃/s的速度加热到1 150 ℃后,保温3 min;以8 ℃/s的速度冷却到1 000 ℃,变形

40%(压下6 mm),变形速率5 s⁻¹;然后以5 ℃/s的速度冷却到900 ℃,变形30%(压下2.7 mm),变形速率50 s⁻¹。试样变形后分别以1、5、10、20、30、40、50、60、70 ℃/s的冷速冷却到400 ℃,然后空冷到室温。

(2)15 ℃/s的速度加热到1 150 ℃,保温3 min后水淬。

(3)15 ℃/s的速度加热到1 150 ℃后,保温3 min;以8 ℃/s的速度冷却到1 000 ℃,变形40%(压下6 mm),变形速率5 s⁻¹;然后以5 ℃/s的速度冷却到900 ℃,变形30%(压下2.7 mm),变形速率50 s⁻¹。试样变形后水淬。

2 试验结果与分析

2.1 试验数据及动态CCT曲线

利用Origin软件对Gleeble-3500热模拟机记录的温度-膨胀量数据进行了处理,FTSR低碳高强钢连续冷却转变的相变点和动态CCT曲线分别见表2和图1。

从表2的实验结果可以看出,随着冷却速度的提高,变形后γ→α的相变温度降低了。这是因为

表1 试验钢T510L的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test steel T510L /%

C	Si	Mn	P	S	Mo	Ti	Als	N	T[O]
0.19	0.32	1.15	0.015	0.006	0.008	0.002	0.032	0.0045	0.0025

表2 低碳高强钢 T510L 的连续冷却相变点及组织硬度
Table 2 CCT point and structure hardness of low carbon high strength steel T510L

冷速/ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)	$A_{r3}/^{\circ}\text{C}$	$A_{r1}/^{\circ}\text{C}$	$B_s/^{\circ}\text{C}$	$B_f/^{\circ}\text{C}$	硬度 (HRB)
1	801	698			85.1
5	732	601			89.8
10	691	581			93.2
20	667	571			94.1
30	654	550			94.5
40	649	549			93.9
50	630		557	400	94.8
60	620		554	391	95.1
70	623		552	386	94.3

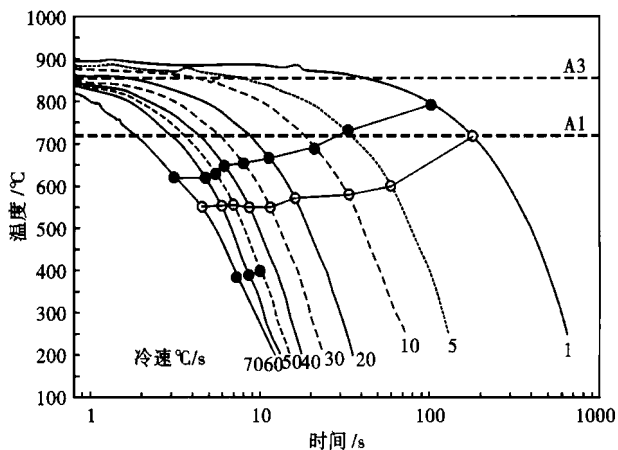


图1 低碳高强钢 T510L 的连续冷却转变曲线

Fig. 1 CCT curves of low carbon high strength steel T510L

变形后,一方面组织处于不稳定的高自由能状态,具有一种向着变形前较低自由能状态恢复的趋势;另一方面 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的相变为受界面控制的扩散型相变,冷却速度提高,过冷度 ΔT 增大,使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变的自由能差值 ΔG 增大,即相变的驱动力增大。随着过冷度的加大,晶界、亚晶界、位错等处的临界形核自由能与均匀形核时的临界自由能相比逐渐变小。这就意味着随着过冷度的加大,在晶界上越容易形核,故在轧后冷却过程中使铁素体相变越发在较低的温度下进行,即导致相变点温度 A_{r3} 降低。

从表2还可以看出,低碳高强钢的硬度值随冷却速度的增加而增大,冷却速度较小时,硬度变化显著;但当冷却速度达到 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,硬度值变化缓慢。因为当冷速在一定范围内变化时,随着冷却速度的提高,变形晶粒的回复软化作用减弱,组织中保留了密度较高的缺陷(如位错等)的储存能,结构强化增强,因此组织的硬度值升高。

相变温度 A_{r3} 越低,奥氏体区域相对越大,越能获得较为细小的铁素体晶粒。这是因为铁在铁素体区中的自扩散系数比在奥氏体区中高一个数量级,

即在同一温度下处于铁素体状态的晶粒长大要容易得多;若在奥氏体未再结晶温度和 A_{r3} 温度之间保证有足够的变形量,将使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变比值提高。由图1还可以看出,本实验中 $\gamma + \alpha$ 两相区的温度区间都在 100°C 以上。故在控制轧制后的冷却中,应依据产品的性能要求和设备的能力采用快速强力冷却措施,以避免铁素体晶粒的过分长大。

2.2 显微组织

在一定的化学成分和相同的变形工艺条件下,影响晶粒细化的主要因素为相变点 A_{r3} 以下两相区内的冷却速度^[2]。由图1和图2可以看出,随着冷却速度增加,奥氏体-铁素体的开始转变温度 A_{r3} 显著降低,珠光体形成温度 A_{r1} 随冷却速度增加也有下降的趋势,但要缓慢得多;增加冷却速度显著降低 A_{r3} ,并使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的过冷度增加,所以它不但提高了 α 新相的形核率,并且延缓 α 晶粒向未相变的 γ 母相中的生长,导致最终组织的晶粒尺寸减小。

图2中,冷速较低时,铁素体晶粒呈多边形状;冷速高时,铁素体晶粒基本呈尖角型。因为变形不仅使铁素体晶粒的形核率显著提高,而且使奥氏体的表观距离缩短,增加了已在相对的界面上形核并且正在长大的 α 晶粒相遇的机会,在非再结晶区大压下变形后的先共析 α 晶粒,形状不完全是各向同性的,容易在最终组织中形成尖角形晶粒。当冷速为 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时得到的是铁素体+珠光体的混合组织,多边形铁素体的晶粒直径 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,珠光体片层结构十分明显,片层间距在 $0.5 \mu\text{m}$ 以下;当冷速为 $5^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,铁素体平均晶粒直径在 $10 \mu\text{m}$ 左右,珠光体团变得更加细小、弥散;当冷速为 $10^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,组织进一步细化,但仍为铁素体和珠光体的混合组织;冷速为 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,铁素体和珠光体的数量减少,沿原奥氏体晶界有魏氏组织铁素体形成;随着冷速提高到 $30 \sim 50^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,有明显的贝氏体形成,并且冷速越快贝氏体所占的体积分数就越大;当冷速进一步增加到 $70^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,贝氏体的含量更多,甚至出现了少量马氏体组织。但当冷速达到 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上时,晶粒的尺寸变化缓慢。

在本实验中,当冷却速度为 $20^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,出现魏氏组织。钢中碳含量在 $0.15\% \sim 0.50\%$ 时易产生魏氏体组织。在FTSR工艺条件下,原始奥氏体晶粒较为粗大,当变形量不足以细化奥氏体到一定程度时,容易产生魏氏组织。增加总压下量和每道次采用最大可能压下量,且在奥氏体未再结晶温度和

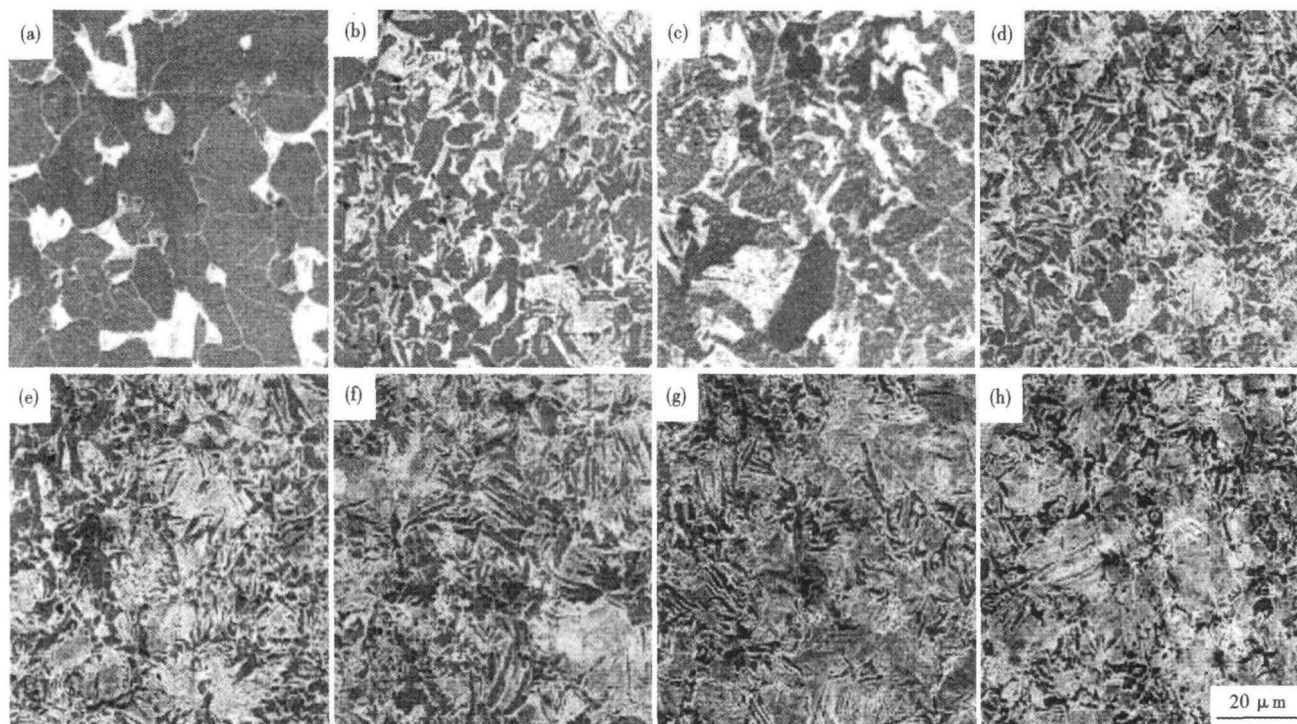


图 2 不同冷速下低碳高强钢 T510L 的组织形貌, SEM, °C/s: (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 20; (e) 30; (f) 40; (g) 50; (h) 70
Fig. 2 Structure morphology of low carbon high strength steel T510L with different cooling rate, SEM, °C/s: (a) 1; (b) 5; (c) 10; (d) 20; (e) 30; (f) 40; (g) 50; (h) 70

Ar_3 温度之间保证有足够的变形量,适当加快冷却速度,可避免魏氏组织的形成。魏氏组织会使钢的力学性能,尤其塑性和冲击韧性显著降低^[3]。

轧后快速冷却使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变开始温度 Ar_3 移向较低温度。加速冷却在细化铁素体晶粒的同时也细化了珠光体,减少了珠光体的量,可减轻或消除珠光体带状组织,特别是可减小珠光体的片层间距和渗碳体层的厚度。晶粒细化可以同时提高屈服强度和抗拉强度,而加速冷却产生的贝氏体强化不仅细化了有效晶粒尺寸且对强度有贡献,其相变应力场还对抗拉强度的增加有明显贡献,因而一定体积分数的贝氏体组织可以降低屈强比。如果能够通过控制轧制和冷却工艺参数在钢板中既得到较细的铁素体晶粒,又生成部分贝氏体,就可能在获得高屈服强度的同时,降低材料的屈强比。

3 结论

(1) FTSR 低碳高强钢的连续冷却相变温度随着冷却速度的提高而降低,珠光体转变温度随冷却速度的增加也有下降的趋势,但要缓慢得多。 α 相变转变点温度较低,但 $\gamma + \alpha$ 两相区的温度区间都在 100 °C 以上,故在控制轧制后的冷却中,应依据产品的性能要求和设备的能力采用快速强力冷却措施,以避免铁素体晶粒的过分长大。

(2) 连续冷却转变的显微组织为大量铁素体和部分珠光体,冷速高于 30 °C/s 时,组织中还有少量的粒状贝氏体。铁素体的晶粒尺寸随冷速的提高而减小,在本实验变形程度下,当冷速达到 20 °C/s 以上时,晶粒的细化程度减弱。

(3) 终轧后加速冷却可以增大相变的过冷度,增加形核驱动力,在细化铁素体晶粒的同时也细化了珠光体,减少了珠光体的量,可减轻或消除珠光体带状组织,特别是可减小珠光体的片层间距和渗碳体层的厚度。

唐山市科学技术研究与发展计划资助项目,项目编号:04204501C-227

参考文献

- 1 Francesco Stella, Paolo Bobig, Andrea Carboni, et al. 优质超薄产品用的 FTSR 技术发展. 钢铁, 2003, 38(4): 46
- 2 于浩. CSP 热轧低碳钢板组织细化与强化机理研究[博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2002
- 3 赵乃琴, 杨志刚, 冯运莉. 合金固态相变. 长沙: 中南大学出版社, 2008

高爱民(1966-), 女, 硕士, 副教授, 冶金物理化学、金属材料的强化与韧化研究。

收稿日期: 2009-03-18